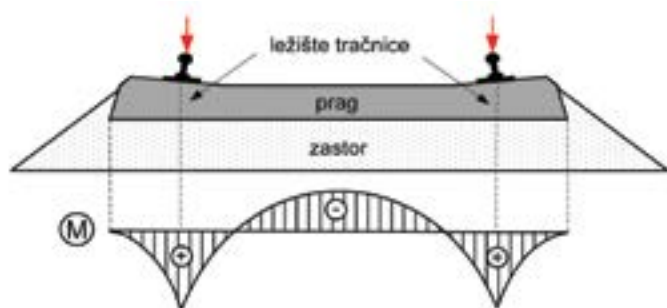


Izv. prof. dr. sc. Domagoj Damjanović, dipl. ing. građ.
 doc. dr. sc. Ivan Duvnjak, dipl. ing. građ.
 doc. dr. sc. Marko Bartolac, dipl. ing. građ.
 dr. sc. Marina Frančić Smrkić, mag. ing. aedif.
 Janko Koščak, mag. ing. aedif.

STATIČKO I DINAMIČKO ISPITIVANJE BETONSKIH ŽELJEZNIČKIH PRAGOVA

1. Uvod

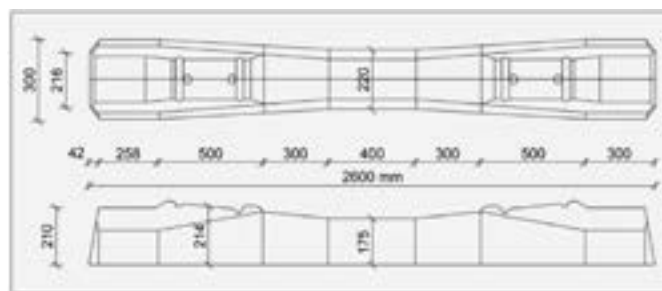
Kolosiječna konstrukcija sastoji se od tračnica, sustava pričvršćenja, pragova i tucaničkog zastora. Željeznički pragovi imaju ulogu prijenosa opterećenja s tračnica na zastor [1][2], a njihova trajnost i mehanička otpornost znatni su čimbenici kod održavanja željezničkih kolosijeka [3]. Raspodjela naprezanja u pragovima najviše ovisi o zbijenosti zastora i njegovu granulometrijskom sastavu, svojstvima koja su podložna odstupanjima, pa je točnu raspodjelu naprezanja često teško odrediti [4]. Postoje različiti pristupi određivanju raspodjele naprezanja između zastora i pragova, a većina njih uzima rezultirajući moment savijanja kao pozitivan na mjestu oslanjanja tračnice i kao negativan u sredini praga [5] (slika 1.).



Slika 1. Dijagram momenata savijanja željezničkog praga [6]

Kod kolosijeka s tucaničkim zastorom najčešće se koriste prednapeti betonski pragovi, čiji je očekivani vijek trajanja približno 50 godina. Kako bi se osigurao navedeni vijek trajanja, uz redovite kontrole u proizvodnji pragovi moraju proći stroga i opsežna ispitivanja koja su propisana europskim normama [7]. U radu je dan pregled ispitivanja prednapetih jednodijelnih betonskih pragova koja su definirana normom HRN EN 13230-2:2016 – Željeznički sustav -- Željeznički gornji ustroj -- Betonski pragovi i nosači – 2. dio: Jednodijelni prednapeti betonski pragovi [8]. Norma određuje statičko i dinamičko ispitivanje presjeka na

mjestu ležišta tračnice i statičko ispitivanje središnjeg presjeka na negativni moment savijanja. Kao opcionalna ispitivanja norma određuje ispitivanje središnjeg presjeka na pozitivan moment savijanja i ispitivanje na zamor presjeka na ležištu tračnice koje se provodi do dva milijuna ciklusa opterećenja. Statičkim ispitivanjem presjeka na mjestu ležišta tračnice treba obuhvatiti šest pragova, a statičkim ispitivanjem središnjeg presjeka na negativni moment savijanja tri praga. Dinamičko ispitivanje presjeka na mjestu ležišta tračnice obuhvaća ispitivanje šest pragova, dok se opcionalno ispitivanje na zamor provodi na jednome uzorku. Ispitivanja su provedena na prednapetim betonskim pragovima tipa PB-85K (slika 2.).



Slika 2. Geometrija pragova tipa PB-85K [9]

Provedeno je i vlačno ispitivanje plastičnih uložaka tipa SDU 25 za pričvršćenje tirfona ugrađenih u armiranobetonske prednapete pragove tipa PB-85K. Ispitivanje je izvedeno prema zahtjevima norme HRN EN 13481-2:2017 – Oprema za željeznice – Željeznički gornji ustroj – Zahtjevi za izradbu kolosiječnoga pričvrstnog pribora - 2. dio: Kolosiječni pričvrstni pribor za betonske pragove [10]. Norma određuje provedbu ispitivanja na tri uzorka.

Sva ispitivanja provedena su u Laboratoriju za ispitivanje konstrukcija Zavoda za tehničku mehaniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

2. Statičko ispitivanje presjeka na mjestu ležišta tračnice

2.1. Osnovne postavke ispitivanja

Raspored oslonaca i opterećenja kod statičkog ispitivanja presjeka na mjestu ležišta tračnice prikazan je na slici 3. Udaljenost između oslonaca L_r određuje se prema vrijednostima danima u tablici 1., a u skladu sa zahtjevima norme HRN EN 13230-2:2016 [8]. Za pragove čije je ispitivanje prikazano u ovome poglavlju udaljenost osi ležišta tračnice od ruba praga L_p iznosi 0,55 m te je za udaljenost između osi oslonaca L_r odabrana vrijednost od 0,6 m.

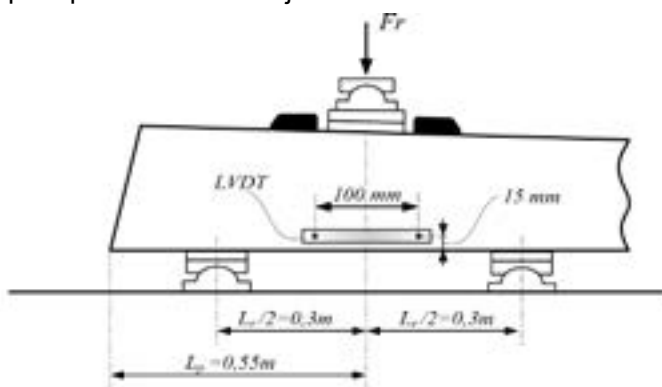
Tablica 1. Vrijednosti L_r u ovisnosti o L_p

L_p (m)	L_r (m)
$L_p < 0,349$	0,3
$0,350 \leq L_p < 0,399$	0,4
$0,400 \leq L_p < 0,449$	0,5
$L_p \geq 0,450$	0,6

Pozitivna početna referentna sila pri ispitivanju presjeka na mjestu ležišta tračnice Fr_0 određena je prema izrazu (1). Pozitivni proračunski moment savijanja $M_{k,r,pos} = 16$ kNm odredio je naručitelj.

$$Fr_0 = \frac{4 \cdot M_{k,r,pos}}{L_r - 0,1} = \frac{4 \cdot 16}{0,6 - 0,1} = 128 \text{ kN} \quad (1)$$

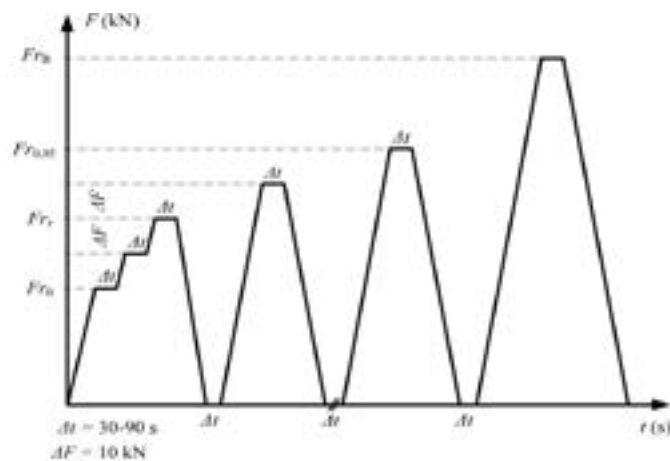
Procedura statičkog ispitivanja presjeka na mjestu ležišta tračnice provodi se prema režimu opterećenja prikazanog na slici 5. Brzina prirasta opterećenja mora biti manja od 120 kN/min, a u ovome ispitivanju iznosila je 100 kN/min. U prvome se koraku opterećenje nanosi do sile Fr_0 i zatim povećava u koracima s prirastom od 10 kN. Tijekom ispitivanja potrebno je pratiti otvaranje prve pukotine u vlačnoj zoni ležišta tračnice vizualnim


Slika 3. Raspored oslonaca i opterećenja za ispitivanje na mjestu ležišta tračnice

Slika 4. Statičko ispitivanje na mjestu ležišta tračnice

pregledima. Nakon koraka u kojemu se otvori prva pukotina, uzorak se rasterećuje, a dostignuta razina opterećenja proglašava se eksperimentalno određenom silom Fr_r .

Nakon određivanja sile pri kojoj nastaje prva pukotina Fr_r , uzorak se dalje opterećuje u koracima od 10 kN uz rasterećivanje nakon svakog koraka prirasta opterećenja. Pri tome je potrebno odrediti maksimalnu silu za koju širina pukotine nakon rasterećenja iznosi 0,05 mm, $Fr_{0,05}$. Kod ispitivanja za precizno praćenje širine pukotine korištena su LVDT (engl. *Linear Variable Differential Transformer*) osjetila. Osjetila se nalaze na sredini raspona L_r na bazi od 100 mm (slika 3.). U zadnjemu koraku ispitivanja uzorak se opterećuje do maksimalne sile Fr_B nakon koje se ne može ostvariti daljnji prirast opterećenja. Treba napomenuti to da u ovome ispitivanju stvarna sila Fr_B nije dosegnuta kod ispitanih uzoraka. Naime, zbog velikih deformacija i potencijalnog nestabilnog (nesigurnog) loma uzoraka ispitivanja su prekinuta pri sili od 510 kN, koja je manja od sile Fr_B . Opterećenje je nanošeno univerzalnim statičkim tlačno-vlačnim ispitnim strojem kapaciteta ± 600 kN.


Slika 5. Procedura statičkog opterećenja presjeka na mjestu ležišta tračnice

2.2. Rezultati statičkog ispitivanja presjeka na mjestu ležišta tračnice

Statičkim ispitivanjem presjeka na mjestu ležišta tračnice obuhvaćeno je ukupno šest pragova. Koeficijente k_t , k_{1s} i k_{2s} za proračun opterećenja odredio je naručitelj, a uvjeti koje pragovi moraju zadovoljiti prema zahtjevima norme HRN EN 13230-2:2016 jesu sljedeći:

$$Fr_r > k_t \cdot Fr_0 = 1,625 \cdot 128 = 208 \text{ kN} \quad (2)$$

$$Fr_{0,05} > k_{1s} \cdot Fr_0 = 2,125 \cdot 128 = 272 \text{ kN} \quad (3)$$

$$Fr_B > k_{2s} \cdot Fr_0 = 3,0 \cdot 128 = 384 \text{ kN} \quad (4)$$

Tablica 2. Rezultati statičkog ispitivanja presjeka na mjestu ležišta tračnice

Oznaka uzorka	F_{r} (kN)		$F_{r_{0,05}}$ (kN)		F_{r_B} (kN)	
	ostvareno	zahtijevano	ostvareno	zahtijevano	ostvareno	zahtijevano
BP-02/17-SL-1	248	208	368	272	510	384
BP-02/17-SL-2	258		358			
BP-02/17-SL-3	258		358			
BP-02/17-SL-4	238		388			
BP-02/17-SL-5	238		368			
BP-02/17-SL-6	258		388			

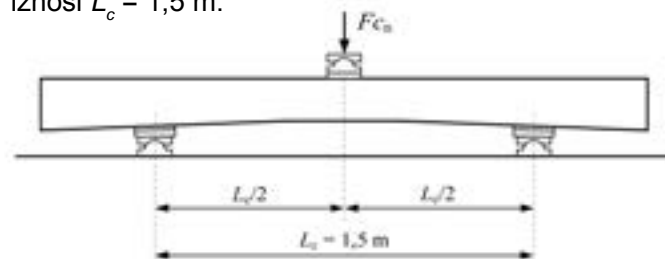
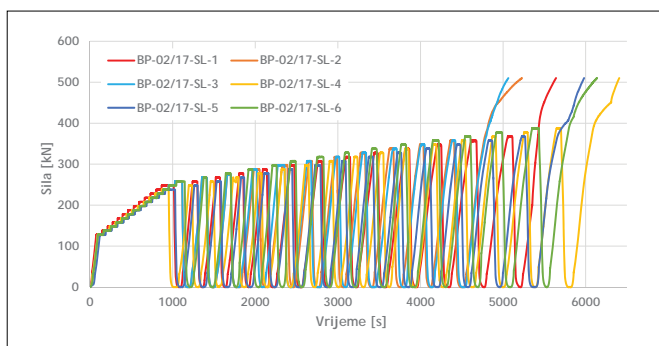
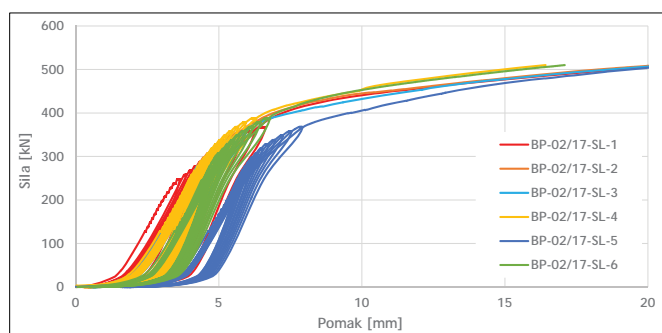
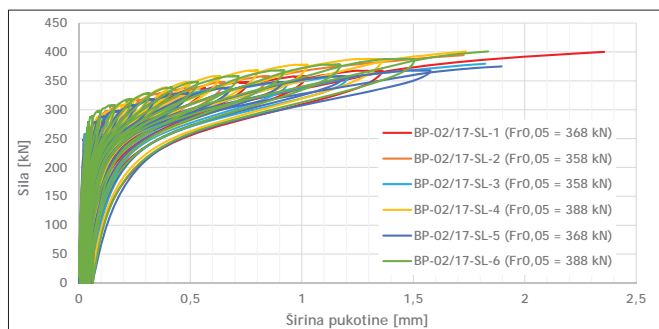
pri čemu je F_r pozitivna sila pri kojoj dolazi do pojave prve pukotine, $F_{r_{0,05}}$ sila za koju širina pukotine nakon rasterećenja iznosi 0,05 mm, a F_{r_B} sila nakon koje se ne može ostvariti daljnji prirast opterećenja (vrijednosti su prikazane u tablici 2.). Kao što je objašnjeno u prethodnome dijelu, sile F_{r_B} prikazane u tablici 2. ne odgovaraju stvarnome kapacitetu nosivosti pragova, već silama pri kojima je zbog velikih deformacija i

potencijalnog nestabilnog (nesigurnog) loma uzoraka prekinuto ispitivanje. Dijagrami sila – vrijeme, sila – pomak i sila – širina pukotine za sve ispitane uzorke prikazani su na slikama 6., 7. i 8.

3. Statičko ispitivanje središnjeg presjeka na negativni moment savijanja

3.1. Osnovne postavke ispitivanja

Raspored oslonaca i način nanošenja opterećenja za statičko ispitivanje središnjega presjeka na negativan moment savijanja prikazan je na slici 9. Oslonci praga kod ispitivanja središnjega presjeka nalaze se na mjestima ležišta tračnica i njihova međusobna udaljenost iznosi $L_c = 1,5$ m.


Slika 9. Raspored oslonaca i opterećenja za statičko ispitivanje središnjega presjeka

Slika 6. Dijagrami sila – vrijeme za sve uzorke

Slika 7. Dijagrami sila – pomak za sve uzorke

Slika 8. Dijagrami sila – širina pukotine za sve uzorke

Slika 10. Statičko ispitivanje središnjega presjeka na negativan moment

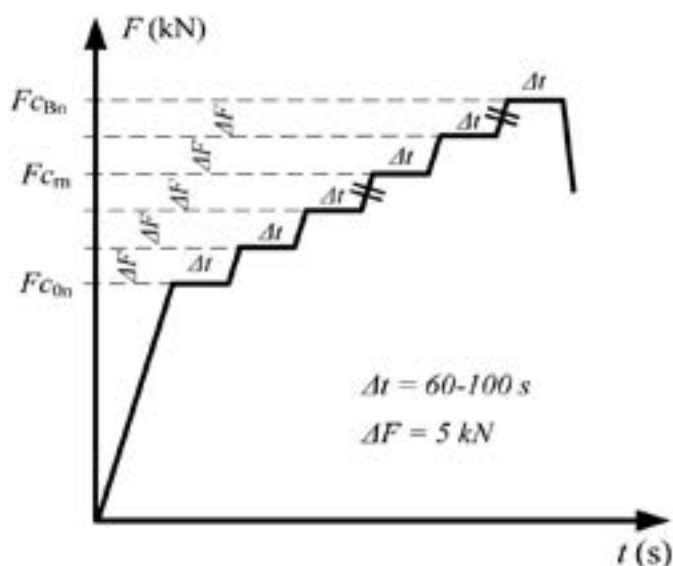
Negativna početna referentna sila pri ispitivanju središnjeg presjeka $F_{c_{0n}}$ određena je prema izrazu (5) uz korištenje negativnoga proračunskog momenta savijanja u središnjemu presjeku $M_{k,c,neg} = 12$ kNm koji je odredio naručitelj.

$$F_{c_{0n}} = \frac{4 \cdot M_{k,c,neg}}{L_c - 0,1} = \frac{4 \cdot 12}{1,5 - 0,1} = 34,29 \text{ kN} \quad (5)$$

Procedura statičkoga ispitivanja središnjega presjeka na negativan moment provedena je prema režimu opterećivanja koji je prikazan na slici 11., a prema zahtjevima norme HRN EN 13230-2:2016. Brzina prirasta opterećenja iznosila je 100 kN/min. Prva pukotina detektirana je vizualnim pregledima nakon svakog prirasta opterećenja od 5 kN. U trenutku pojave prve pukotine određena je sila F_{c_m} (negativna sila pri kojoj se javlja prva pukotina u središnjemu presjeku).

Nakon što je određena sila pri kojoj nastaje prva pukotina, uzorak se dalje opterećuje u koracima s prirastom sile od 5 kN bez rasterećenja do maksimalne negativne sile $F_{c_{Bn}}$ nakon koje se ne može ostvariti daljnji prirast opterećenja.

Opterećenje je nanošeno dinamičkim tlačno-vlačnim ispitnim strojem kapaciteta ± 600 kN. Za precizno praćenje širine pukotine korištena su LVDT osjetila kojima su mjereni pomaci na sredini raspona L_c , na bazi od 100 mm. Vertikalni pomaci mjereni su uz pomoć LVDT osjetila proizvođača HBM-a i mjernog područja 50 mm.



Slika 11. Procedura statičkog ispitivanja središnjega presjeka na negativan moment savijanja

3.2. Rezultati statičkog ispitivanja središnjeg presjeka na negativan moment savijanja

Statičkim ispitivanjem središnjega presjeka na negativan moment savijanja obuhvaćena su ukupno tri praga. Koeficijent za proračun opterećenja odredio je naručitelj, a uvjeti koje pragovi moraju zadovoljiti prema zahtjevima norme HRN EN 13230-2:2016 jesu sljedeći:

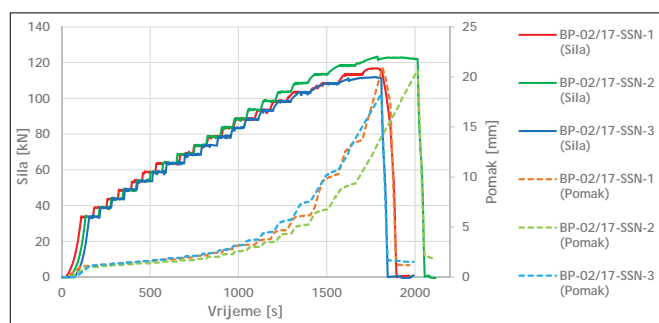
$$F_{c_{rn}} > k_t \cdot F_{c_{0n}} = 1,416 \cdot 34,29 = 48,7 \text{ kN} \quad (6)$$

$$F_{c_{Bn}} > 74,3 \text{ kN} \quad (7)$$

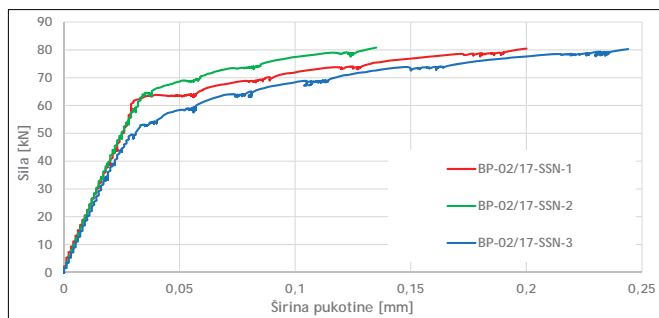
pri čemu je F_{c_m} negativna sila pri kojoj se pojavljuje prva pukotina u središnjemu presjeku, a $F_{c_{Bn}}$ maksimalna negativna sila nakon koje se ne može ostvariti daljnji prirast opterećenja. Vrijednosti su prikazane u tablici 3. Zapisi mjerenja sile, pomaka i širine pukotine za sve ispitane uzorke, prikazani su u vremenu i međusobnoj ovisnosti na slikama 12., 13. i 14.

Tablica 3. Rezultati statičkog ispitivanja središnjeg presjeka na negativan moment savijanja

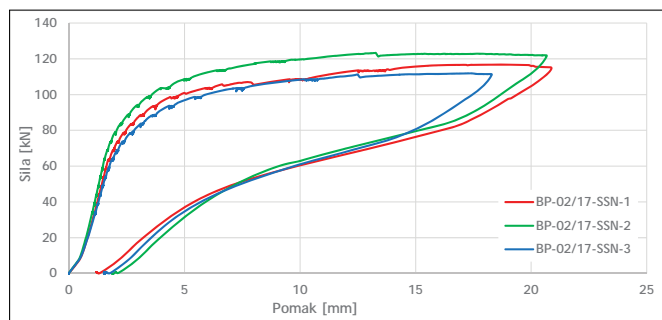
Oznaka uzorka	F_{c_m} (kN)		$F_{c_{Bn}}$ (kN)	
	ostvareno	zahtijevano	ostvareno	zahtijevano
BP-02/17-SSN-1	64	48,7	117	74,3
BP-02/17-SSN-2	64		124	
BP-02/17-SSN-3	59		112	



Slika 12. Dijagrami sila – vrijeme i pomak – vrijeme



Slika 13. Dijagrami sila – širina pukotine



Slika 14. Dijagrami sila – pomak

4. Dinamičko ispitivanje na mjestu ležišta tračnice

4.1. Osnovne postavke ispitivanja

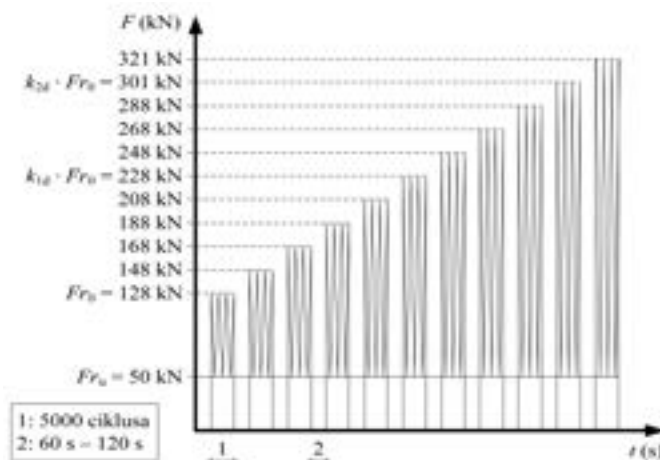
Raspored oslonaca i opterećenja za dinamičko ispitivanje presjeka na mjestu ležišta tračnice jednak je kao kod statičkog ispitivanja spomenutog presjeka (slika 3.).

Procedura dinamičkoga ispitivanja presjeka na mjestu ležišta tračnice provedena je prema režimu opterećivanja koji je prikazan na slici 15., a prema zahtjevima norme HRN EN 13230-2:2016. Dinamičko opterećenje nanosi se sinusnom funkcijom čija je frekvencija u području od 2 Hz do 10 Hz (u ovome slučaju ispitivanje je provedeno frekvencijom od 7 Hz). Ispitivanje se sastoji od ukupno 11 faza od po 5000 ciklusa opterećenja. Donja granica opterećenja u svim fazama dinamičkog opterećenja iznosi $Fr_u = 50$ kN, a između faza uzorak se rasterećuje. U prvoj fazi gornja granica jest pozitivna početna referentna sila za ispitivanje presjeka na mjestu ležišta tračnice $Fr_0 = 128$ kN (jednako kao kod statičkog ispitivanja; vidi 2. poglavlje). U narednim fazama gornja granica opterećenja povećava se s korakom prirasta od 20 kN. Prirast opterećenja u koracima prije računskih opterećenja $Fr_{0,05}$ i $Fr_{0,5}$ (nakon kojih se pojavljuju pukotine širine 0,05 mm i 0,5 mm) može biti i manji od 20 kN, a najviša razina opterećenja odgovara sili $Fr_{0,5} + 20$ kN. Računska opterećenja $Fr_{0,05}$ i $Fr_{0,5}$ određena su prema izrazima (8) i (9), pri čemu je predmetne koeficijente odredio naručilatelj:

$$Fr_{0,05} = k_{1d} \cdot Fr_0 = 1,781 \cdot 128 = 228 \text{ kN} \quad (8)$$

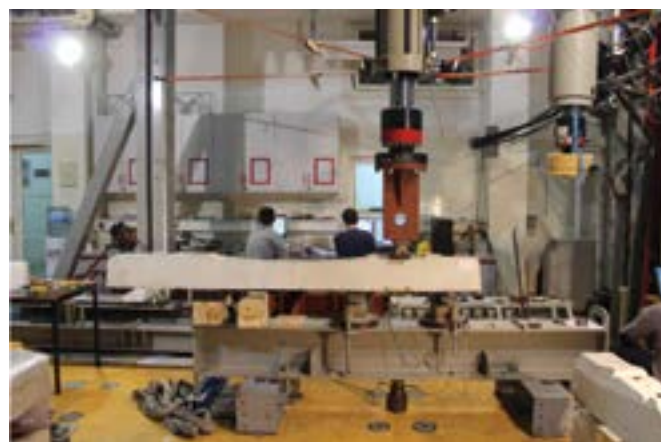
$$Fr_{0,5} > k_{2d} \cdot Fr_0 = 2,351 \cdot 128 = 301 \text{ kN} \quad (9)$$

Tijekom ispitivanja potrebno je pratiti otvaranje pukotine u vlačnoj zoni ležišta tračnice te u fazama rasterećenja odrediti širinu pukotine. Pauza između pojedinih faza ne smije biti dulja od pet minuta. Kod ispitivanja za



Slika 15. Procedura dinamičkog ispitivanja presjeka na mjestu ležišta tračnice

precizno praćenje širine pukotine korištena su LVDT osjetila postavljena na sredini raspona L_p na bazi od 100 mm. Podaci (sila i širina pukotine) su se prikupljali s frekvencijom uzorkovanja od 200 Hz te su zbog toga trajno pohranjivani samo podaci na početku i na kraju svake faze od 5000 ciklusa.



Slika 16. Dinamičko ispitivanje na mjestu ležišta tračnice

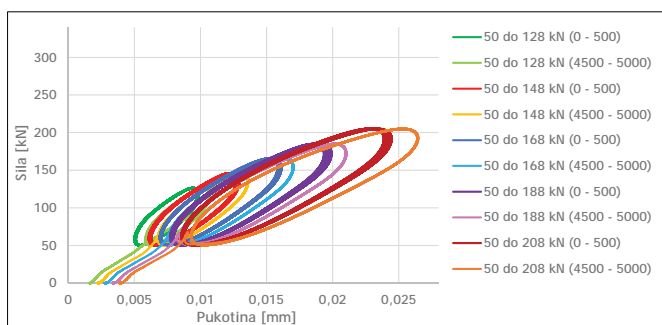
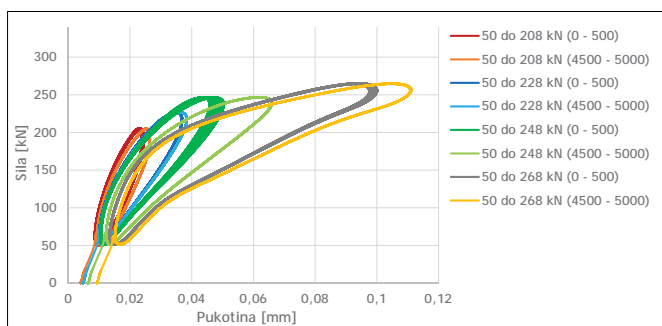
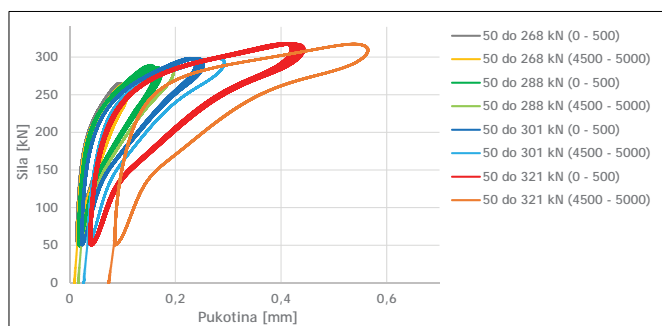
4.2. Rezultati dinamičkog ispitivanja presjeka na mjestu ležišta tračnice

Dinamičkim ispitivanjem presjeka na mjestu ležišta tračnice obuhvaćeno je ukupno šest pragova. Prema zahtjevima norme HRN EN 13230-2:2016, eksperimentalno određene sile nakon kojih ostaju pukotine širine 0,05 mm i 0,5 mm moraju biti veće od računskih vrijednosti sila $Fr_{0,05}$ i $Fr_{0,5}$ određenih prema izrazima (8) i (9).

Širina pukotine kontinuirano je mjerena za vrijeme ispitivanja. U tablici 4. prikazane su vrijednosti izmjerenih širina pukotina na kraju svake faze od 5000 ciklusa, što uključuje i vrijednosti nakon računskih sila

Tablica 4. Izmjerene širine pukotina po fazama dinamičkog ispitivanja (nakon 5000 ciklusa pri $F=0$ kN) za sve ispitane uzorke

Faza opterećenja		Širina pukotine za uzorak BP-02/17-DL- i (mm)					
Broj faze	Vrijednost sile	1	2	3	4	5	6
1	50 kN – 128 kN	0,002	0,006	0,001	0,000	0,001	0,002
2	50 kN – 148 kN	0,002	0,007	0,001	0,001	0,001	0,003
3	50 kN – 168 kN	0,003	0,007	0,002	0,001	0,002	0,004
4	50 kN – 188 kN	0,003	0,008	0,003	0,002	0,002	0,005
5	50 kN – 208 kN	0,004	0,009	0,004	0,002	0,003	0,006
6	50 kN – 228 kN	0,005	0,010	0,004	0,003	0,004	0,007
7	50 kN – 248 kN	0,006	0,011	0,006	0,003	0,005	0,008
8	50 kN – 268 kN	0,009	0,014	0,009	0,005	0,007	0,011
9	50 kN – 288 kN	0,016	0,019	0,013	0,009	0,013	0,016
10	50 kN – 301 kN	0,026	0,026	0,018	0,013	0,023	0,025
11	50 kN – 321 kN	0,074	0,065	0,043	0,033	0,056	0,055


Slika 17. Dijagram sila – širina pukotine na početku i na kraju faza ispitivanja 1-5

Slika 18. Dijagram sila – širina pukotine na početku i na kraju faza ispitivanja 5-8

Slika 19. Dijagram sila – širina pukotine na početku i na kraju faza ispitivanja 8-11

$Fr_{0,05}$ i $Fr_{0,5}$. Zapisi mjerenja sile i širine pukotine na početku i na kraju svake faze opterećenja prikazani su na slikama 17., 18. i 19. za jedan ispitni uzorak (BP-02/2017-DL-1).

5. Ispitivanje presjeka na mjestu ležišta tračnice na zamor

5.1. Osnovne postavke ispitivanja

Ispitivanje presjeka na mjestu ležišta tračnice na zamor nije obavezno, odnosno provodi se na zahtjev naručitelja. Ispitivanje je provedeno na jednome uzorku. Raspored oslonaca i opterećenja za ispitivanje presjeka na mjestu ležišta tračnice na zamor jednak je kao i kod statičkog i dinamičkog ispitivanja (slika 3.).

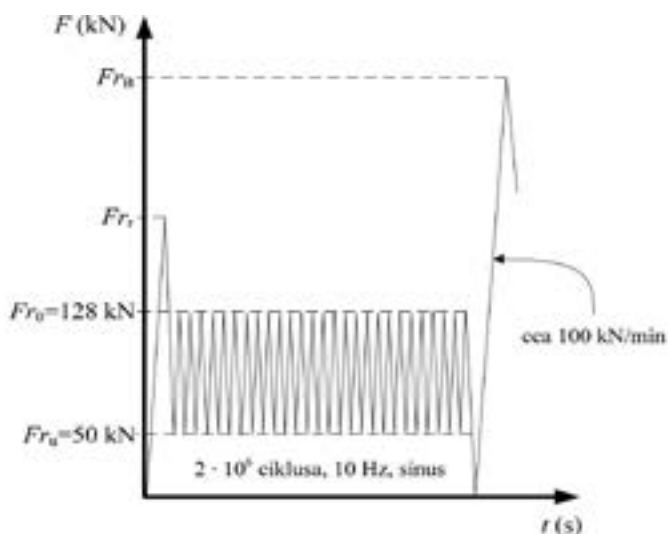
Procedura ispitivanja presjeka na mjestu ležišta tračnice na zamor provedena je prema režimu opterećivanja koji je prikazan na slici 20., a prema zahtjevima norme HRN EN 13230-2:2016. Prije ispitivanja na zamor potrebno je statički opteretiti uzorak do sile Fr_r pri kojoj se pojavljuju prve pukotine. Ispitivanje na zamor provodi se do dva milijuna ciklusa opterećenja koje se nanosi sinusnom funkcijom s frekvencijom od 2 Hz do 10 Hz. U ovome slučaju ispitivanje je provedeno s frekvencijom od 10 Hz. Donja granica opterećenja kod ispitivanja na zamor jest $Fr_u = 50$ kN, dok je gornja granica pozitivna početna referentna sila za ispitivanje presjeka na mjestu ležišta tračnice $Fr_0 = 128$ kN.

Nakon provedenih dva milijuna ciklusa opterećenja uzorak se statički opterećuje uz prirast opterećenja od oko 100 kN/min do maksimalne sile Fr_B nakon

koje se ne može ostvariti daljnji prirast opterećenja. Prema zahtjevima norme HRN EN 13230-2:2016, nakon provedenog ispitivanja na zamor pri ponovno-
 me statičkom opterećenju do sile Fr_0 pukotina mora biti manja od 0,1 mm, a nakon rasterećenja manja od 0,05 mm. Maksimalna vrijednost sile Fr_B nakon koje se ne može ostvariti daljnji prirast opterećenja mora zadovoljiti izraz (10), pri čemu je koeficijent k_3 odredio naručitelj:

$$Fr_B > k_3 \cdot Fr_0 = 3,437 \cdot 128 = 440 \text{ kN} \quad (10)$$

Za precizno praćenje širine pukotine korištena su LVDT osjetila kojima su mjereni pomaci na sredini raspona L_p na bazi od 100 mm. Vertikalni pomaci mjereni su uz pomoć LVDT osjetila proizvođača HBM-a i mjernog područja 50 mm. Podaci (sila, pomak pistonu i širina pukotine) su se prikupljali frekvencijom uzorkovanja od 200 Hz, i to na početku ispitivanja te na svakih 100 000 ciklusa.



Slika 20. Procedura ispitivanja presjeka na mjestu ležišta tračnice na zamor



Slika 21. Ispitivanje presjeka na mjestu ležišta tračnice na zamor

5.2. Rezultati ispitivanja presjeka na mjestu ležišta tračnice na zamor

Relevantni rezultati ispitivanja na zamor prikazani su u tablici 5. Statičkim opterećivanjem prije ispitivanja na zamor određena je sila Fr_r pri kojoj se pojavljuju prve pukotine i ona iznosi 278 kN. Zapis sila – širina pukotine za navedeno ispitivanje prikazan je na slici 22.

Tijekom ispitivanja na zamor izvedeno je mjerenje širine pukotine (LVDT osjetilom) i sile na početku ispitivanja, a potom nakon svakih sljedećih 100 000 ciklusa. Na slici 23. izdvojeni su zapisi sila – širina pukotine s početka ispitivanja i svakih sljedećih 500 000 ciklusa.

Nakon dva milijuna ciklusa opterećenja uzorak je statički opterećen do maksimalne sile $Fr_B = 544$ kN. Zapisi tog ispitivanja prikazani su na slikama 24. i 25.

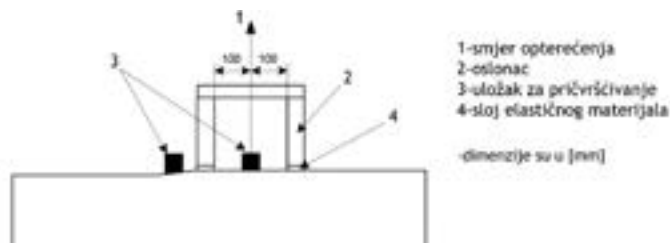
Tablica 5. Rezultati ispitivanja presjeka na mjestu ležišta tračnice na zamor

Parametar	Vrijednost	
	ostvareno	zahtijevano
Fr_r – sila pri kojoj se pojavljuju prve pukotine	278 kN	-
Širina pukotine pri sili Fr_0	0,014 mm - 0,018 mm	$\leq 0,1$ mm
Širina pukotine nakon rasterećenja sa sile Fr_0	0,008 mm	$\leq 0,05$ mm
Fr_B – maksimalna sila nakon koje se ne može ostvariti daljnji prirast opterećenja	544 kN	>440 kN

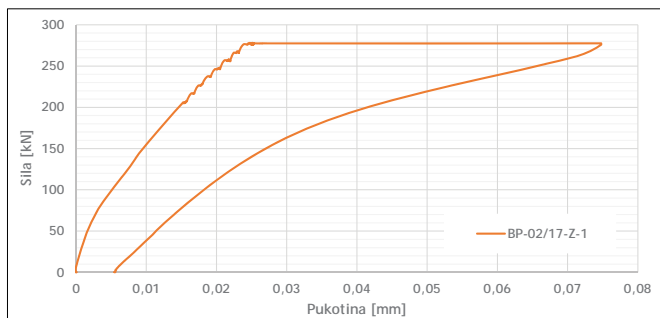
6. Vlačno ispitivanje plastičnih uložaka za pričvršćenje tirfona

6.1. Osnovne postavke ispitivanja

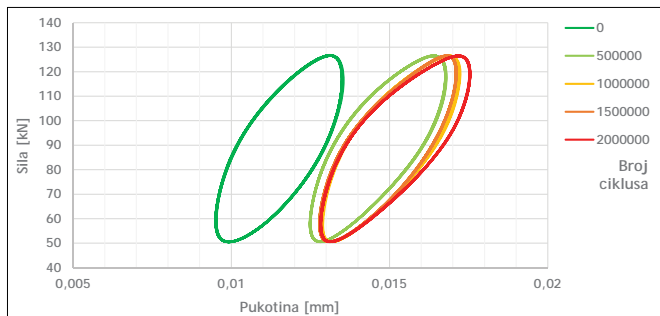
Raspored oslonaca i opterećenja za vlačno ispitivanje plastičnih uložaka za pričvršćenje tirfona prikazan je na slici 26. Oslonci za opterećenje nalaze se na udaljenosti od 100 mm od osi uložka koji se ispituje. U uložak je ugrađen tirfon koji se ispitnim strojem povlači u smjeru okomitom na ležište tračnice s prirastom opterećenja od 50 ± 10 kN/min.



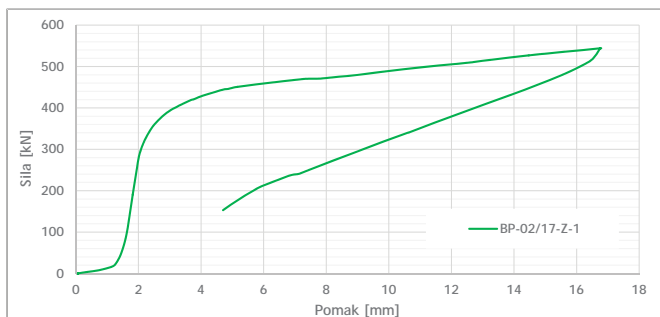
Slika 26. Raspored oslonaca i opterećenja za ispitivanje plastičnih uložaka



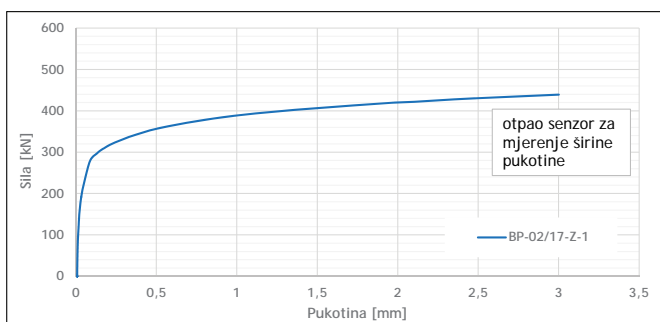
Slika 22. Dijagram sila – širina pukotine do pojave prve pukotine pri statičkome ispitivanju, a prethodno pri ispitivanju na zamor



Slika 23. Dijagram sila – širina pukotine pri ispitivanju na zamor svakih 500 000 ciklusa



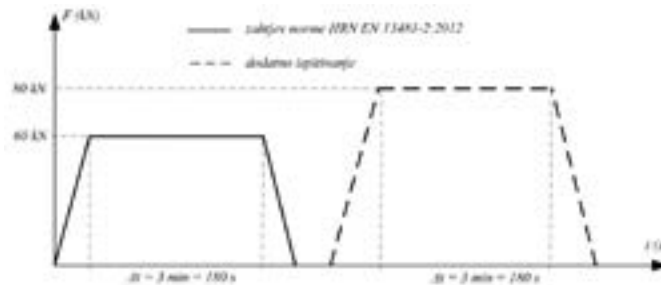
Slika 24. Dijagram sila – pomak pri statičkom ispitivanju do maksimalne sile nakon ispitivanja na zamor



Slika 25. Dijagram sila – širina pukotine pri statičkom ispitivanju do maksimalne sile nakon ispitivanja na zamor

Režim opterećivanja prema zahtjevima norme HRN EN 13481-2:2017 – Oprema za željeznice – Željeznički gornji ustroj – Zahtjevi za izradbu kolosiječnog pričvrstnog pribora – 2. dio: Kolosiječni pričvrstni pribor za betonske pragove [10] prikazan je na slici 27. Opterećenje zahtijevano u navedenoj normi iznosi 60 kN te ga

je potrebno održavati u periodu od tri minute. Dodatno na zahtjeve naručitelja uzorci su opterećeni silom od 80 kN koje je zadržano u periodu od tri minute (slika 27).



Slika 27. Procedura opterećenja plastičnih uložaka za tirfone

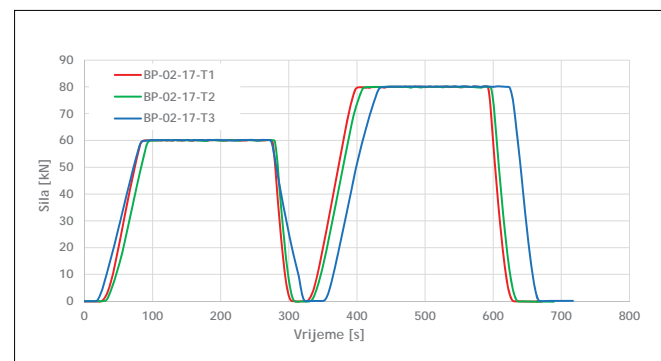


Slika 28. Vlačno ispitivanje plastičnih uložaka

6.2. Rezultati ispitivanja

Ispitivanjem su obuhvaćena ukupno tri praga, a na svakom je pragu ispitivan po jedan plastični uložak tipa SDU 25. Prema zahtjevima norme HRN EN 13481-2:2017, nakon rasterećenja u zoni oko uložka za pričvršćenje tirfona ne smiju postojati pukotine na betonu vidljive golim okom. Zapis sile u vremenu tijekom ispitivanja za sva tri uzorka prikazan je na slici 29.

Vizualnim pregledom nakon rasterećenja nisu uočene pukotine na betonu u zoni oko uložka za pričvršćenje tirfona.



Slika 29. Dijagram sila u vremenu za sva tri ispitna uzorka

7. Zaključak

Trajnost i mehanička otpornost pragova važni su čimbenici kod održavanja željezničkih kolosijeka. Kako bi se osigurao očekivani vijek trajanja od otprilike 50 godina, pragovi moraju zadovoljiti stroge i opsežne zahtjeve ispitivanja propisane europskim normama.

Ispitivanja betonskih željezničkih pragova prikazana u ovome radu provedena su u skladu s normom HRN EN 13230-2:2016 – Željeznički sustav -- Željeznički gornji ustroj -- Betonski pragovi i nosači – 2. dio Jednodijelni prednapeti betonski pragovi. Norma određuje statičko i dinamičko ispitivanje presjeka na mjestu ležišta tračnice i statičko ispitivanje središnjeg presjeka na negativni moment savijanja. Kao opcionalna ispitivanja norma određuje ispitivanje središnjeg presjeka na pozitivan moment savijanja i ispitivanje na zamor presjeka na ležištu tračnice koje se provodi do dva milijuna ciklusa opterećenja. Tijekom svih ispitivanja kontinuirano su praćeni sila, pomak i širina pukotina preko LVDT osjetila, što omogućuje pouzdano i učinkovito određivanje svih parametara traženih u normi, i to s vrlo visokom točnošću. Na temelju svih provedenih ispitivanja i prikupljenih podataka može se zaključiti to da ispitani željeznički pragovi zadovoljavaju tražene uvjete te da postoje znatne rezerve u pogledu nosivosti.

U skladu s normom HRN EN 13481-2:2017, provedeno je vlačno ispitivanje plastičnih uložaka za pričvršćenje tirfona na tri uzorka. Vizualnim pregledom nakon rasterećenja nisu uočene pukotine na betonu u zoni oko uložka za pričvršćenje tirfona te je zaključeno to da ispitani uložci zadovoljavaju tražene uvjete.

Literatura:

- [1] Mohammadzadeh, S., Vahabi E.: Time-dependent reliability of B70 pre-stressed concrete sleeper to deterioration, *Engineering Failure Analysis*, 2011, 18, pp. 421–432.
- [2] Esveld C.: Modern railway track, Delft University of Technology Pub. Serve.; Holland, 2001.
- [3] Damjanović D., Bartolac M., Duvnjak I., Koščak J.: Ispitivanje betonskih željezničkih pragova, Dani hrvatske komore inženjera građevinarstva, Opatija; 2017.
- [4] Kaewunruen, S., Remennikov AM.: Dynamic flexural influence on a railway concrete sleeper in track system due to a single wheel impact, *Engineering Failure Analysis*, 2009, 16, pp. 705–712.
- [5] Sadeghi, J. M., Babae A.: Structural optimization of B70 railway prestressed concrete sleepers, *Iran J Sci Technol Trans B Eng*, 2006; 30, pp. 461–473.
- [6] Damjanović D., Rak M., Duvnjak I., Bartolac M., Frančić M.: Statičko i dinamičko ispitivanje prednapetih jednodijelnih željezničkih pragova, Sabor hrvatskih graditelja 2012, Cavtat; 2012. pp. 619–630.
- [7] Damjanović D., Rak M., Duvnjak I., Frančić M., Planić S.: Static, dynamic and fatigue testing of railway sleepers, Proceedings of the 29th Danubia-Adria-Syposium on Advances in Experimental Mechanics, 2012., pp. 32–33.
- [8] HRN EN 13230-2:2016 – Željeznički sustav -- Željeznički gornji ustroj -- Betonski pragovi i nosači – 2. dio: Jednodijelni prednapeti betonski pragovi
- [9] Damjanović D., Duvnjak I., Bartolac M., Frančić M.: Statičko i dinamičko ispitivanje armiranobetonskih pragova, Mjerenja ispitivanja i monitoring na prometnicama, Dani prometnica 2013, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za prometnice; 2013. pp. 131–158.
- [10] HRN EN 13481-2:2017 – Oprema za željeznice - Željeznički gornji ustroj – Zahtjevi za izradbu kolosiječnoga pričvrstnog pribora - 2. dio: Kolosiječni pričvrstni pribor za betonske pragove

UDK: 625.142

Adresa autora:

Izv. prof. dr. sc. Domagoj Damjanović, dipl. ing. građ.
ddomagoj@grad.hr

doc. dr. sc. Ivan Duvnjak, dipl. ing. građ.
iduvnjak@grad.hr

doc. dr. sc. Marko Bartolac, dipl. ing. građ.
mbartolac@grad.hr

dr. sc. Marina Frančić Smrkić, mag. ing. aedif.
mfrancic@grad.hr

Janko Koščak, mag. ing. aedif.
jkoscak@grad.hr

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet,
Zavod za tehničku mehaniku
Fra Andrije Kačića-Miošića 26, 10 000 Zagreb

SAŽETAK

Trajnost i mehanička otpornost pragova važan su čimbenik u održavanju željezničkih kolosijeka. Kako bi se osigurao očekivani vijek trajanja od otprilike 50 godina, pragovi moraju zadovoljiti stroge i opsežne zahtjeve ispitivanja propisane europskim normama. U radu su prikazana eksperimentalna ispitivanja betonskih željezničkih pragova tipa PB-85K koja su provedena prema normi HRN EN 13230-2:2016. Prikazani rezultati statičkih, dinamičkih i ispitivanja na zamor pokazuju to da ispitani pragovi imaju znatne rezerve u odnosu na uvjete tražene normom.

Gljučne riječi: željeznički pragovi, ispitivanje, savijanje, pukotina, nosivost, zamor

Kategorizacija: pregledni članak

SUMMARY

STATIC AND DYNAMIC TESTING OF CONCRETE RAILWAY SLEEPERS

Durability and mechanical resistance of sleepers are significant factors for maintenance of the railway tracks. In order to achieve life time expectation of approximately 50 years, sleepers need to pass through extensive experimental testing given by european standards prior to their installation. This paper presents experimental testing of railway concrete sleepers type PB-85K according to standard HRN EN 13230-2:2016. Static, dynamic and fatigue testing results show that railway sleepers have significant reserves in comparison to requirements given by norm.

Key words: railway sleepers, testing, bending, crack, bearing capacity, fatigue

Categorization: review paper